

補間運動を含む到達運動決定規範の消費エネルギーに基づく検討

谷合 由章^{†a)} 西井 淳[†]

An Evaluation of Trajectory Planning Models Based on Energy Cost during Reaching Submovements

Yoshiaki TANIAI^{†a)} and Jun NISHII[†]

あらまし 脳がヒトの四肢到達運動軌道を決定する規範を探る計算論的研究がこれまで様々な視点により行われてきた。消費エネルギー最小規範は軌道決定規範として検討されたものの一つであるが、この規範に基づく運動軌道は実際の到達運動の特徴と異なることが報告されている。このことは、軌道計画が消費エネルギーの大小と無関係に行われていることを意味しているのだろうか。本研究では、これまで消費エネルギー最小規範の検討に含められていなかった生体ノイズの影響を考慮し、手先の到達位置誤差を補正する補間運動を含めた平均総消費エネルギー量を消費エネルギー最小規範、終点分散最小規範、トルク変化最小規範のそれぞれについて求め、どの規範が消費エネルギーの観点において有利であるかを検討した。その結果、ノイズの影響が大きいときには、ヒトの四肢到達運動の特徴をよく表すことが知られている終点分散最小規範とトルク変化最小規範が総消費エネルギー量を低く抑える到達運動を実現できることが分かった。

キーワード 消費エネルギー最小規範、終点分散最小規範、トルク変化最小規範、四肢到達運動、補間運動

1. ま え が き

ヒトが四肢到達運動を行う際の手先の運動軌道はほぼ直線であり、その速度波形はベル型になることが知られている [1]。すなわち、手先の速度は運動の開始後滑らかに増加し、運動時間の約半分で最大となり、その後滑らかに減少していく。このような運動を脳が決定する運動規範として、Hogan は 1984 年に躍度最小規範を提案した [2]。この規範は手先のキネマティクスに注目してその滑らかさを軌道計画の拘束条件として表現したものである。一方、Uno らはダイナミクスに注目したトルク変化最小規範 [1] を提案した。躍度最小規範とトルク変化最小規範はいずれも到達軌道の特徴をよく表すため、両者に関する様々な比較検討が行われてきた [3]。更に、Harris と Wolpert は脳から腕の筋肉へ送られる筋指令が生体ノイズにさらされていると考え、ノイズによる腕の終端位置への影響が小さくなるような運動軌道を脳は計画しているとする終

点分散最小規範を 1998 年に提案した [4]。このモデルは、脳が身体を制御する際の軌道決定に外乱が大きな影響を及ぼし得ることに注目した点で興味深い。

一方、歩行運動の多くの特徴は消費エネルギー最小規範で説明できることが報告されている [5] ~ [7]。生体が消費エネルギーをできるだけ低く抑えた運動を行うことは生存確率を大きくするために重要と考えられる。消費エネルギー最小規範は腕の到達運動に関しても検討されてきたが [8], [9], 消費エネルギーを最小にする四肢運動軌道は速度波形が台形となるなどの点で実際のヒトの運動の特徴と異なることが示されている [9]。この結果は、到達運動の運動軌道が滑らかさ若しくは外乱等の要因のみで決定されており、消費エネルギーとは無関係に計画されていることを意味するのだろうか。

到達運動において、ノイズの影響を無視して計画された消費エネルギー最小運動を実現する関節トルクは、運動の開始時に特に大きな値をとることが示唆されている [9]。このような運動に Harris と Wolpert が仮定したような運動指令の大きさに比例した分散をもつ運動指令依存ノイズ (signal-dependent noise) が加わると、手先の到達位置は大きくばらつくと考えられる。

[†] 山口大学大学院理工学研究科, 山口市
Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, 1677-1 Yoshida, Yamaguchi-shi, 753-8512 Japan
a) E-mail: yosi@bcl.sci.yamaguchi-u.ac.jp

ヒトの到達運動においては、到達位置の誤差が大きいときには位置を補正するための補間運動 (corrective submovement) が生じることが報告されている [10] ~ [13] . この補間運動まで考慮した場合、これまで消費エネルギー最小とされていた運動と終点分散最小規範等の他の規範ではいずれが総消費エネルギーを低く抑えることができるのだろうか .

本論文では、生体ノイズを考慮した上で、消費エネルギー最小規範及び、実際の腕の運動軌道の特徴をよく表すと報告されている終点分散最小、トルク変化最小の各規範について補間運動も含めた到達運動の総消費エネルギー量を求め、どの規範が消費エネルギーの観点において有利であるかを考察した結果を報告する .

2. 計算機実験の方法

本研究では、到達目標範囲まで腕を動かすのに要する消費エネルギーを以下のように見積もった (図 1) . まず、各最適化規範に基づき運動開始地点から到達目標地点への運動指令を求める . 次に、その運動指令に運動指令依存ノイズが加わった信号による運動軌道 (主動運動) を求める . 手先が主動運動において到達目標範囲に到達しなかった場合、到達地点から到達目標地点に向けた運動 (補間運動) に対する運動指令及び運動軌道を同様にして得る . 手先が到達目標範囲に到達するまで以上の計算を繰り返し行い、到達に要した総消費エネルギー量とその分散、及び到達試行運動 (主動運動及び補間運動) の平均回数とその分散を 50

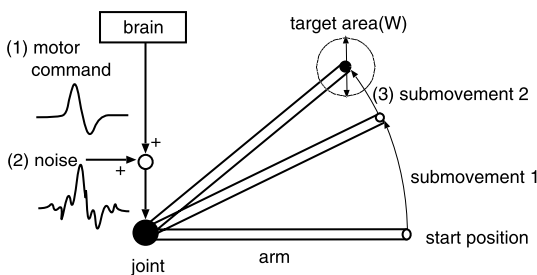


図 1 腕の到達運動の計算機シミュレーション . (1) 運動開始地点から到達目標地点への各最適規範に基づく運動指令を求める . (2) 運動指令依存ノイズによって影響を受けた運動指令による運動軌道を求める . (3) 主動運動によって手先が目標範囲に到達しなかった場合、到着地点から目標範囲に向けた補間運動のための運動指令を求め、運動軌道を求める . 手先が到達目標範囲に到達するまで補間運動の計算を繰り返し行う .

Fig. 1 Schematic view of the arm reaching movement in the simulation experiment.

回のモンテカルロ計算により求めた . 計算時間の都合上、補間運動は最大で 6 回までとした . 運動指令 u に影響を与えるノイズ w は、平均が 0、分散が $k|u|^2$ のガウス性ノイズとし [4]、様々な比例定数 k について実験を行った . 腕の初期位置から目標到達範囲までの回転角度は 0.5 rad、到達目標範囲 W は 0.04 m とした . 腕の力学モデルとしては 1 関節の線形筋骨格モデルを用いた (図 2) [14] . 筋の興奮・活動に関する時定数 (図 2 の T_1 及び T_2) はそれぞれ 0.04 s、0.03 s とし、最大筋力 F_{max} 、腕のモーメントアーム r と慣性モーメント I はそれぞれ 1000 N、0.04 m、0.25 kgm² とした [14] . 腕の質量は 2.5 kg、長さは 0.55 m、関節の粘性係数は 1.18 Nms/rad [15] とし、肩関節から腕の重心までの距離は Winter (1990) の見積り方法により 0.29 m とした [16] . 運動中の消費エネルギーとしては、腕を水平面内で動かすために要するエネルギーと、水平面内に腕を支えるための垂直方向のトルク発生に要するエネルギーを考慮し、次式で見積もった .

$$\sum_{i=1}^N \int_0^{T_i} \{P(\tau_v, 0) + P(\tau_{hi}, \dot{\theta}_{hi})\} dt \quad (1)$$

ここで、 N は手先が目標到達範囲に到達するまでに必要とされた到達運動の回数、 τ_v は水平面内に腕を保つための垂直方向の関節トルク (一定値)、 τ_{hi} 、 $\dot{\theta}_{hi}$ 及び T_i はそれぞれ i 回目に行われた到達運動における水平方向の関節トルク、水平方向の角速度及び到達運動の運動時間である . P はエネルギー代謝を表す関数であり、Alexander (1997) による次のような推定式を用いた [8] .

$$P(\tau, \dot{\theta}) = \tau_{iso}(\tau, \dot{\theta}) \dot{\theta}_{max} \Phi(\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max}) \quad (2)$$

ここで、 τ_{iso} は筋肉の等尺運動時の関節トルクを求

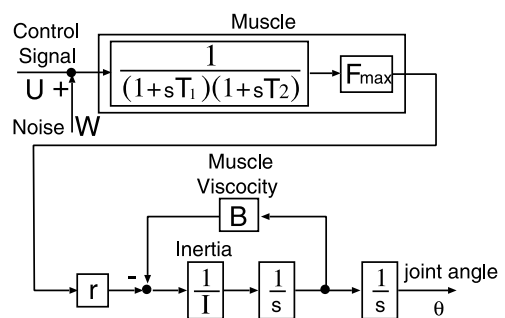


図 2 1 関節の線形腕モデル

Fig. 2 A one dimensional linear model of a musculoskeletal system.

めるための関数、 $\dot{\theta}_{max}$ は筋肉の最大収縮速度に相当する関節の角速度、 Φ は代謝率関数である。 $\dot{\theta}_{max}$ は Alexander (1997) と同様に 15 rad/s とした。

消費エネルギー最小規範の評価式は、式 (1) のうち 1 回の到達運動のみに注目した次式となる。

$$\int_0^T \{P(\tau_v, 0) + P(\tau_h, \dot{\theta}_h)\} dt \quad (3)$$

ここで、 T は運動時間である。終点分散最小規範の評価式は、Wolpert と Harris (1998) と同様に $\int_T^{T+R} V_t dt$ とした。ただし、 V_t は時刻 t における位置のばらつき、 R ($= T$) は運動終了後の待機時間 (post-movement time) を表す。トルク変化最小規範の評価式は $\int_0^T (d\tau/dt)^2 dt$ である [1]。各規範に基づく最適な運動指令はそれぞれ制約付き非線形計画法の一つである逐次二次計画法 (SQP 法) により求めた。なお、最適化計算における離散時間の刻み幅は運動時間を 50 分割したものとした。

ここで、補間運動を含む各到達試行運動の運動時間 T をどのように決めたらよいかの問題である。本実験においては、(1) ヒトが到達運動を行うときの運動時間を最適規範とは独立に決める方法、及び (2) 各最適規範に基づいた運動時間を用いる方法の二つの方法で検討を行った。(1) では、ヒトが上肢到達運動を行うとき、到達運動時間は目標到達エリアの幅及び目標到達エリアまでの距離によって決まるとする Fitts の法則 [17] を定式化した Kvålseth (1980) による以下の関係式 [18] により運動時間を決定した。

$$T = c \left(\frac{D}{W} \right)^p \quad (4)$$

ここで、定数 c と p はそれぞれ 0.171, 0.362, T は運動時間、 D は目標到達地点までの距離、 W は目標到達範囲であり、図 3 に示すように運動の困難さの指標 D/W が大きくなるほど運動時間は長くなる。(2) の方法では以下のように各最適規範に対する運動時間を決定した。消費エネルギー最小規範に基づく運動時間は、目標到達地点までの距離が 0.0 から 0.5 rad までの 0.05 rad 刻みの各移動距離において最適な運動時間をそれぞれ求め、これを三次のスプライン関数により補間することにより、任意の到達目標地点までの距離と運動時間の関係を決定した。終点分散最小規範によって計画される運動時間は、Harris と Wolpert (1998) によって提案された方法に従って以下のように決定した [4]。ノイズの分散値 $k|u|^2$ を決める定数 k を

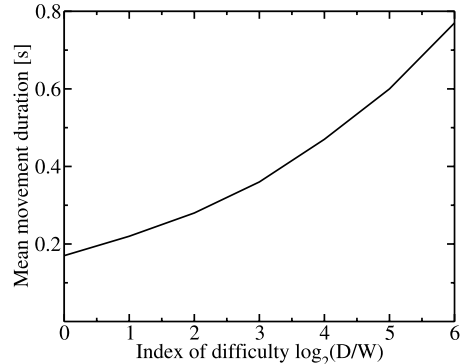


図 3 到達運動課題の困難さと到達運動時間の関係 [18]
Fig. 3 Relation between index of difficulty and movement duration obtained [18].

0.005 + 0.01 × Δd ($\Delta d = 0, 1, \dots, 7$) とした各場合について、いくつかの D/W に対して 95% の確率で到達可能な運動時間 T を求め、その結果を三次のスプライン関数により補間することにより、任意の運動の困難さ D/W に対する運動時間を決めた。なお、トルク変化最小規範については、最適な運動時間は無限長になってしまうため、この最適規範に基づく運動時間を用いた検討は行っていない。

3. 実験結果

3.1 Fitts の法則に基づく運動時間による総消費エネルギーの比較

各運動時間を Fitts の法則に基づいて決定した場合について、目標範囲内への到達運動に必要とされた到達試行運動 (主動運動と補間運動) の平均回数を図 4 に示す。ノイズの大きさを決める定数 k が大きくなると、まず消費エネルギー最小規範によって必要とされる補間運動の回数が大きく増加していく。 k が 0.02 以上になると、トルク変化最小規範によって必要とされる補間運動の回数が増加し始める。しかし、終点分散最小規範で必要とされる補間運動の平均回数は k が増加してもあまり変わらない。

図 5 は目標範囲への到達に必要とされる総消費エネルギー量の平均値を示す。ノイズ定数 k が 0.01 以下のときは消費エネルギー最小規範に基づく到達運動の総消費エネルギー量が最も少なくなるが、 k の値が大きくなるにつれてトルク変化最小規範及び終点分散最小規範による消費エネルギーが最小値を与えるようになる。すなわち、ヒトの到達運動の特徴をよく表す終点分散最小規範とトルク変化最小規範による軌道は、

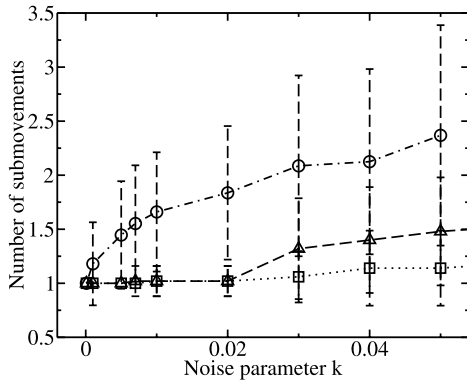


図 4 到達運動に必要とされた到達試行運動の平均回数と標準偏差。この運動時間は Fitts の法則により決定した。消費エネルギー最小規範、トルク変化最小規範、終点分散最小規範によって必要とされた到達運動の回数をそれぞれ \circ , \square , \triangle 点で表す。

Fig. 4 Average numbers of corrective submovements required to reach the target area by criteria of minimization of the energy cost (\circ), the endpoint variance (\square) and the torque change (\triangle). The movement duration was determined by Fitts' law. The error bar shows the standard deviation.

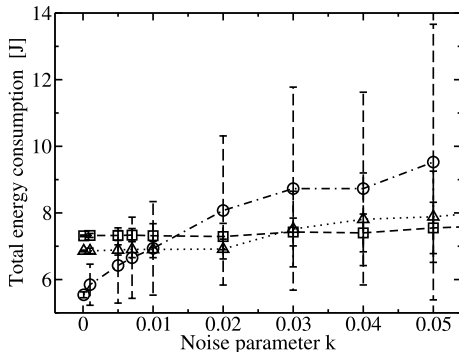


図 5 生体ノイズの大きさ k と各最適化規範による補間運動も含めた到達運動の平均総エネルギー消費量の関係。運動時間は Fitts の法則により決定した。消費エネルギー最小規範、トルク変化最小規範、終点分散最小規範による総消費エネルギー量をそれぞれ \circ , \square , \triangle 点で表した。

Fig. 5 Energy consumptions required to reach the target area by criteria of minimization of the energy cost (\circ), the endpoint variance (\square) and the torque change (\triangle). The movement duration was determined by Fitts' law. The error bar shows the standard deviation.

生体ノイズが大きい場合には総消費エネルギーの観点からも優れていることを以上の結果は示している。ノイズ定数 k を一定とした場合にも同様の理由により、要求される到達運動の困難さ D/W が高い場合にはト

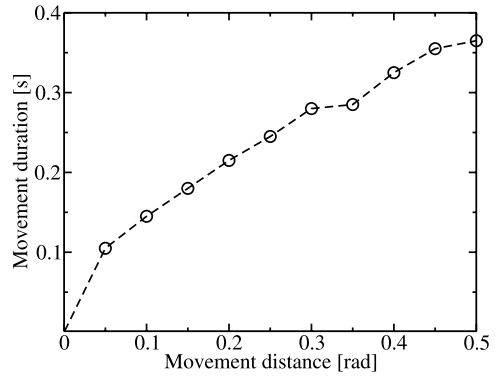


図 6 消費エネルギー最小規範に基づく最適な運動時間
Fig. 6 The optimal movement duration against the movement distance based on the minimum energy consumption model.

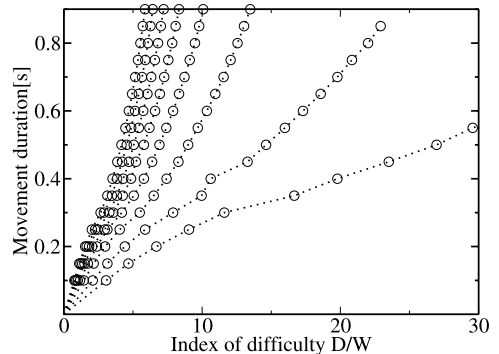


図 7 終点分散最小規範に基づく最適な運動時間。右側の曲線から順に、ノイズ定数 k を $0.005 + 0.01 \times \Delta d$ ($\Delta d = 0, 1, \dots, 7$) の各値にした場合について、到達運動の困難さ D/W を 95% の確率で実現できる運動時間を求めたものである。

Fig. 7 The optimal movement duration against the index of difficulty based on the endpoint variance model.

ルク変化最小規範や終点分散最小規範の方が少ないエネルギー消費で到達運動を行えると予想される。

3.2 最適化規範に基づく運動時間による総消費エネルギーの比較

図 6, 図 7 は、それぞれ消費エネルギー最小規範、終点分散最小規範に基づく最適な運動時間を示す。両規範に基づく運動時間は、それぞれ運動の距離若しくは運動の困難さ (D/W) とともに増加することが分かる。また、終点分散最小規範に基づく運動時間は、ノイズの大きさを決める定数 k が大きいほど到達運動の困難さ (D/W) に対する運動時間の増加率は大きい(図 7)。図 8 は、到達運動の困難さを一定値

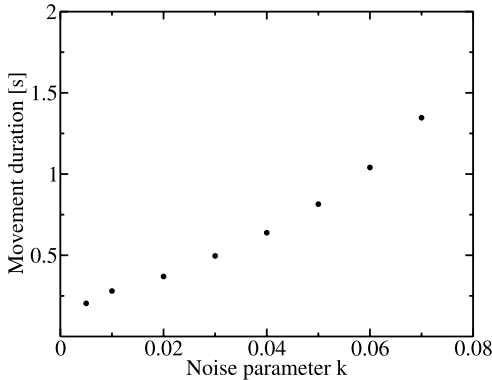


図 8 生体ノイズの大きさに対する終点分散最小規範に基づく最適な運動時間、到達運動の困難さを $D/W=6.87$ と一定とし、ノイズ定数を $k = 0.005 + 0.01 \times \Delta d$ ($\Delta d = 0, 1, \dots, 7$) の各値にした場合について、終点分散最小規範に基づく運動時間を求めたものである。

Fig. 8 The optimal movement duration against the noise parameter k based on the endpoint variance model.

$D/W = 6.87$ とした場合について、ノイズ定数 k に対する終点分散最小規範による最適な運動時間を示す。定数 k が大きいほど、すなわち生体ノイズが大きいほど、終点分散最小規範に基づく最適な運動時間は長くなる事が分かる。

これらの結果を用いて、主動運動及び補間運動の運動時間を決定し、目標到達範囲への到達に必要とされる補間運動の回数を求めた結果を図 9 に示す。終点分散最小規範において、運動時間は 95% の確率で目標到達範囲に 1 回の運動で到達できる値としたため、 k の値によらずほぼ 1 回の到達運動で到達していることが確認できる。それに対し、消費エネルギー最小規範においては、ノイズ定数 k が大きくなるにつれて補間運動の回数に増加傾向が見られ、消費エネルギーも大きくなっていく(図 10)。 k が約 0.02 より大きくなると、終点分散最小規範に基づく運動軌道の方が少ない消費エネルギー量で到達運動を行えることが分かる。しかし、 k が約 0.06 より大きい場合、終点分散最小規範に基づく消費エネルギー量の方が再び大きくなっている。これは、ノイズ定数 k が大きいと終点分散最小規範に基づく運動時間は長くなり(図 8)、水平面内で腕を支えるのに必要な消費エネルギーが大きくなるためと考えられる。

以上の結果は、生体ノイズの大きさによっては終点分散最小規範は総消費エネルギーの観点からも優れた

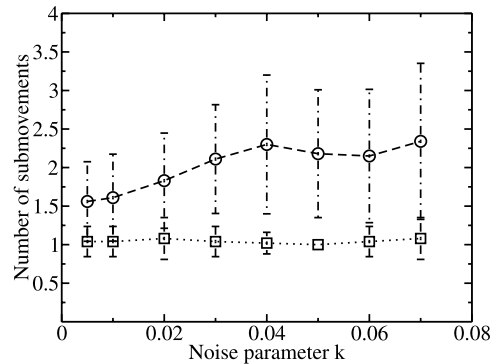


図 9 到達運動で必要とされた補間運動の平均回数と標準偏差。運動時間は各最適規範に基づいて決定した。消費エネルギー最小規範、終点分散最小規範によって必要とされた到達運動の回数を、点で表す。

Fig. 9 Average numbers of corrective submovement required to reach the target area by criteria of minimization of the energy cost (○), the endpoint variance (□). The movement duration was determined by each criterion, respectively (Figs. 6, 7). The error bar shows the standard deviation.

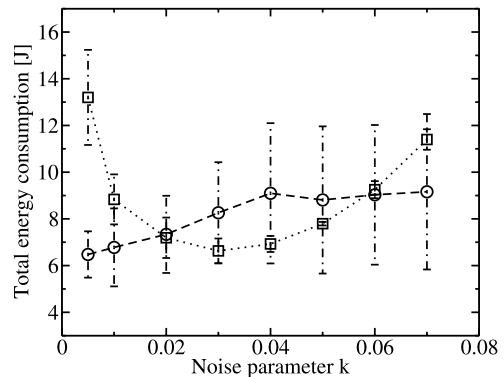


図 10 生体ノイズの大きさ k と各最適規範による補間運動も含めた到達運動の平均総消費エネルギー量の関係。運動時間は最適規範に基づいて決定した。消費エネルギー、終点分散最小規範による総消費エネルギー量をそれぞれ、点で表す。

Fig. 10 Energy consumptions for the reaching movements planned by criteria of minimization of the energy cost (○) and the endpoint variance (□). The movement duration was determined by each criterion, respectively (Figs. 6, 7). The error bar shows the standard deviation.

規範になり得ることを示している。

4. 考 察

以上の計算結果は、ノイズの影響がある程度大きいときには、終点分散最小規範やトルク変化最小規範に

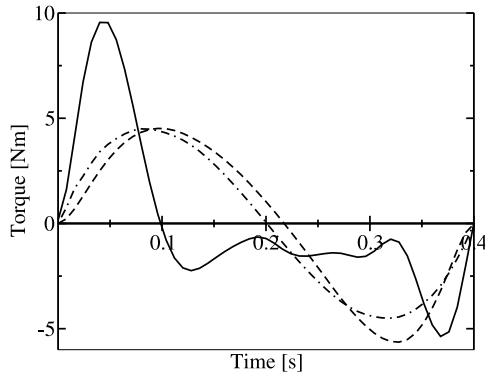


図 11 各最適規範に基づくトルク。消費エネルギー最小規範、終点分散最小規範、トルク変化最小規範に基づく最適なトルクをそれぞれ実線、破線、一点鎖線によって表す。

Fig. 11 Time course of the torques based on the criteria of minimization of the energy cost (solid line), the endpoint variance (dash line), and the torque change (dot-dash line).

基づく軌道は生体ノイズの影響を受けにくいため、消費エネルギー最小規範に基づく軌道よりも少ない総消費エネルギーで到達運動を行えることを示している。では、どうして消費エネルギー最小規範に基づく軌道はノイズの影響を受けやすいのだろうか。

図 11 に、各規範に基づいて計算された最適な関節トルクを示す。1. でも触れたように、消費エネルギー最小規範に基づくトルクは運動開始時に大きなトルクが必要になることが示唆されているが、他の規範に基づくものと比べるとその値は 2 倍程度大きいことが分かる。この大きなトルクを発生させるためには大きな運動指令が必要となり、運動指令依存ノイズの影響を大きく受けることになる。その結果、到達位置のばらつき（誤差）を補正する補間運動が必要となり、総消費エネルギーは大きくなってしまふ。このため、生体ノイズの影響が大きい場合に補間運動も含めた総消費エネルギーを低く抑えるには、トルクの変化が少ないトルク変化最小規範や終点分散最小規範の方が有利となる。生体の運動中におけるノイズの大きさがどの程度かは明らかではないが、以上の結果は、実際の運動軌道計画は消費エネルギー最小化の観点からとらえ直すことができる可能性を示唆している。

本研究においては水平面内の運動のみを扱ったが、Soechting ら (1995) は、三次元空間内における腕の到達運動において腕の始点姿勢と終点姿勢の関係を調べ、終点姿勢は腕を運ぶために必要とされる仕事のうち重

力に抗する仕事を除いた量を最小にするように決定されると報告している [19]。この結果も到達運動の軌道計画が消費エネルギー最小化と無関係ではないことを示唆する。ただし、Soechting らの見積りにおいては消費エネルギーの大部分を占める熱散逸が無視されているため、今後は三次元内の到達運動について消費エネルギーと軌道計画の関係をより詳しく調べていく必要がある。

野中ら (2004) は様々な円形ターゲットまでの距離と大きさに対する水平面上肢到達運動中の筋電信号を計測し、運動の終端点近傍で運動トルク生成のためには不必要な筋の同時活性が生じていることを報告している [20]。野中らはこの筋活性による腕の粘性や剛性といったインピーダンス調節の結果、生体ノイズの影響により生じる上肢の到達位置誤差を小さく抑えている可能性を示した。すなわち、この例も本研究結果と同様に、一見消費エネルギーを大きくするように見える運動が上肢軌道のずれを小さく抑え、結果的に総消費エネルギーを低く抑えた運動を実現していることを示唆するものである。

Miyamoto ら (2004) は、ヒトが手先を一定の加速度をもつターゲット内に入れ続けるという運動タスクにおいて、その手先の経路が最大タスク達成軌道生成規範によって推定できることを報告している [21]。この規範の評価式は、手先がターゲット内に存在する確率を表すタスク達成度と消費エネルギーの線形和で表したものである。この規範の検討において、Miyamoto らは消費エネルギー項をトルクの二乗和の時間平均と仮定して最適軌道を求めており、タスクも 2 点間の到達運動と異なるやや特殊なものであった。本研究では消費エネルギーを生理的なデータに基づくモデルにより推定し、単純な 2 点間の到達運動タスクを扱った。その結果は、与えられたタスク終了条件を満たす運動軌道のうち、消費エネルギーを低く抑えるものが選ばれていることを示唆するものであった。到達軌道を決定する評価関数として、タスク達成度と消費エネルギー最小化が Miyamoto らの仮定のように重み付き和のような形をとると考えるべきか、本研究のように与えられたタスク終了条件が強い拘束として働き、そのもとでの消費エネルギー最小化が行われているかを考察することは今後の課題である。

本研究では生体ノイズを Harris と Wolpert の仮定に従って、その分散値が運動指令 u の 2 乗に比例するガウス性ノイズと仮定した。しかし、Iguchi ら (2005)

は、実際のノイズの分散を決定する指数定数は2よりも小さい可能性があることを指摘し、指数定数の値によっては終点分散最小モデルによる運動軌道が実際の軌道と異なることを示した [22]。到達運動において終点誤差を生じさせる要因は神経系にのる生体ノイズ以外にも、疲労等による筋特性の時間変化や目標位置の認識誤差なども存在する。運動を決定する拘束条件を検討する際には、生体ノイズとしてどのような要素をどのように定量化してモデルに取り入れるかを考察していくことも重要な問題である。

5. む す び

本論文では、これまで消費エネルギー最小規範の検討に含められていなかった生体ノイズの影響を考慮し、手先の到達位置誤差を補正する補間運動を含めた平均消費エネルギー量を消費エネルギー最小規範、終点分散最小規範、トルク変化最小規範のそれぞれについて求め、どの規範が消費エネルギーの観点において有利であるか検討した。その結果、ノイズの影響がある程度大きい場合には、終点分散最小規範やトルク変化最小規範に基づく運動軌道は総消費エネルギーの観点からも優れた規範であることが確認された。この結果は、到達運動の軌道計画も消費エネルギー最小化と関係があることを示唆するものである。はじめにも述べたように、消費エネルギー最小化は生体が淘汰を生き延びるための重要な戦略の一つと考えられ、例えば歩行運動の多くの特徴は消費エネルギー最小化により説明できることが示唆されている。このように、脳はタスクごとに異なる軌道決定基準を採用しているのではなく、タスクを実現するための解空間の中の冗長性を消費エネルギー最小化という基準で解決していると考えられる。

謝辞 本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金特定領域研究、身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現 - 移動知の構成論的理解 - (18047016)の援助を得て実施した。ここに謝意を表す。

文 献

- [1] Y. Uno, M. Kawato, and R. Suzuki, "Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement," *Biol. Cybern.*, vol.61, no.2, pp.89-101, 1989.
- [2] N. Hogan, "Adaptive control of mechanical impedance by coactivation of antagonist muscles," *Trans. Automatic Control*, vol.29, pp.681-690, 1984.
- [3] E. Nakano, H. Imamizu, R. Osu, Y. Uno, H. Gomi, and T. Yoshioka, "Quantitative examinations of internal representations for arm trajectory planning: Minimum commanded torque change model," *J. Neurophysiol.*, vol.81, no.5, pp.2140-2155, 1999.
- [4] C.M. Harris and D.M. Wolpert, "Signal-dependent noise determines motor planning," *Nature*, vol.394, pp.780-784, 1998.
- [5] J. Nishii, "Legged insects select the optimal locomotor pattern based on energetic cost," *Biol. Cybern.*, vol.83, no.5, pp.435-442, 2000.
- [6] J. Nishii, "An analytical estimation of energy cost for legged locomotion," *J. Theor. Biol.*, vol.238, pp.636-645, 2006.
- [7] A.E. Minetti and R.M. Alexander, "A theory of metabolic costs for bipedal gaits," *J. Theor. Biol.*, vol.186, pp.467-476, 1997.
- [8] R.M. Alexander, "A minimum energy cost hypothesis for human arm trajectories," *Biol. Cybern.*, vol.70, no.5, pp.97-105, 1997.
- [9] J. Nishii and T. Murakami, "Energetic optimality of arm trajectory," *Proc. Int. Conf. on Biomechanics of Man*, pp.30-33, 2002.
- [10] Y. Paulignan, M. Jeannerod, C. MacKenzie, and R. Marteniuk, "Selective perturbation of visual input during prehension movements 2. The effects of changing object size," *Exp. Brain Res.*, vol.87, pp.407-420, 1991.
- [11] L.V. Searle and F.V. Taylor, "Studies of tracking behavior. I. Rate and time characteristics of simple corrective movements," *J. Exp. Psychol.*, vol.38, pp.615-631, 1948.
- [12] E.R.F.W. Crossman and P.J. Goodeve, "Feedback control of hand-movement and Fitts' law," *J. Exp. Psychol.*, vol.35A, pp.251-278, 1983.
- [13] T.E. Milner and M.M. Ijaz, "The effect of accuracy constrains on three-dimensional movement kinematics," *Neuroscience*, vol.35, pp.365-374, 1990.
- [14] F.C.T. Van der Helm and L.A. Rozendaal, "Musculoskeletal systems with intrinsic and proprioceptive feedback," in *Biomechanics and Neural Control of Posture and Movement*, ed. J.M. Winter and P.E. Crago, pp.164-174, Springer, New York, 2000.
- [15] 鈴木邦典, 宇野洋二, "最短時間到達運動において脳が適用する滑らかさの規範," *信学論 (D-II)*, vol.J83-D-II, no.2, pp.711-722, Feb. 2000.
- [16] D.A. Winter, *Biomechanics and motor control of human movement*, Wiley, New York, 1990.
- [17] P.M. Fitts, "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement," *J. Exp. Psychol.*, vol.47, no.6, pp.381-391, 1954.
- [18] T.O. Kvålseth, "An alternative to Fitts' law," *Bulletin of the Psychonomic Society*, vol.38, pp.371-373, 1980.
- [19] J.F. Soechting, C.A. Buneo, U. Herrmann, and M.

Flanders, "Moving effortlessly in three dimensions: Does Donder's law apply to arm movement?," J. Neuroscience, vol.15, pp.6271-6280, 1995.

- [20] 野中亮介, 佐藤 誠, 小池康晴, "筋の活動度と Speed-Accuracy Trade-off," 信学論 (D-II), vol.J87-D-II, no.4, pp.1008-1019, April 2004.
- [21] H. Miyamoto, E. Nakano, D.M. Wolpert, and M. Kawato, "TOPS (task optimization in the presence of signal-dependent noise) model," Systems and Computers in Japan, vol.35, no.11, pp.48-58, 2004.
- [22] N. Iguchi, Y. Sakaguchi, and F. Ishida, "The minimum endpoint variance trajectory depends on the profile of the signal-dependent noise," Biol. Cybern., vol.92, no.4, pp.219-228, 2005.

(平成 19 年 1 月 9 日受付, 5 月 31 日再受付)



谷合 由章 (学生員)

2004 山口大・理卒. 2006 同大学院理工学研究科修士課程了. 現在同大学院博士課程在学中. 日本神経回路学会会員.



西井 淳 (正員)

1990 東大・理・生物卒. 1992 同大学院修士課程了. 同年同大・工・助手, 1996 理化学研究所基礎特別研究員, 1999 山口大助教授, 現在に至る. 生体の運動学習, 運動の最適性に関する研究等に従事. 計測自動制御学会, ロボット学会各会員. 博士

(工学).